
АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ
ТВЕРДЫХ СРЕД. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 550.341+550.834+621.319

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА
НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ДОЖДЕВОЙ КАПЛИ**

© 2015 г. Ю. М. Заславский, В. Ю. Заславский

Институт прикладной физики Российской академии наук

603950 Н. Новгород, ул. Ульянова 46

Тел.: +7 (831) 416-47-64; Факс: +7 (831) 436-59-76

E-mail: zaslav@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 13.12.2013 г.

Проведено лабораторное моделирование сейсмического отклика, вызванного воздействием на грунт падающей капли воды. Экспериментально зарегистрирован импульсный сигнал с выхода акселерометров, установленных вблизи точек падения капли на твердую поверхность. Измерен уровень и проанализирован спектр вибросигнала. Теоретические оценки уровня и спектра упруго-волнового отклика согласуются с результатами эксперимента. Результаты моделирования могут быть использованы для снижения уровня шума, вызванного осадками, а также при исследовании особенностей взаимодействия движущейся капли с твердой границей.

Ключевые слова: микросейсмы, дождевая капля, удар о грунт, сейсмический отклик, вибросигнал.

DOI: 10.7868/S0320791915010165

Метеосадки, выпадающие в виде дождя, представляют собой хаотическую во времени последовательность импульсных механических воздействий на поверхность грунта, случайно распределенных по значительной площади. Такое воздействие должно порождать сейсмическое излучение, распространяющееся вдоль свободной земной поверхности и вглубь твердой среды по разным направлениям. При проведении сейсмопоисковых работ и при геофизических исследованиях в дождливую погоду действительно регистрируются колебания почвы, являющиеся помехой при приеме полезного сигнала [1–6], которые представляют собой высокочастотные микросейсмы (microtremors) в частотном диапазоне от десятка до сотни и более герц, малые по уровню и локализованные в точке установки приемника. Очевидно, анализ параметров упруго-волнового отклика на воздействие свободно падающей капли воды должен предшествовать анализу сейсмоакустических эффектов, сопровождающих дождь. Однако не следует исключать, что действие дождя может оказаться более сложным, чем простая суперпозиция актов воздействия множества капель, хотя по данным литературы высокочастотный микросейсмический шум дождя представляет собой излучение одного из видов некогерентных сейсмических источников природного происхождения, действующих хаотически. Можно полагать, что характеристики сейсмосигналов, создаваемых отдельно падающей каплей, требуют самостоятельного теоретического изучения, а также

и экспериментального исследования. Удар о твердую поверхность падающей капли характеризуется сложными динамическими процессами, связанными с преобразованиями формы, разрушением целостности, с разлетом фрагментов и т.д., при этом возмущение, проявляющееся как сейсмический отклик, возбуждаемый импульсом силы при каждом акте, имеет достаточно низкий уровень. Аналогичные эффекты возникают при падении капель дождя на поверхность водоема или при обрушении гребня вспененной ветром волны с образованием и падением капель в воду, в результате чего генерируется гидроакустический шум. Указанное явление изучается сравнительно давно и скрупулезно [7]. В настоящее время также проявляется повышенный интерес к микросейсмическим шумам и к эмиссионной активности естественной природы, в частности, вследствие возможности извлечения информации о нефтегазосодержании в продуктивных пластах и о более глубоких геодинамических процессах. В связи с этим имеет место все более активное развитие работ по сейсмоакустическому мониторингу, а его данные увязываются с результатами теоретического анализа различных моделей источников генерации шума естественного происхождения.

Воздействие дождя на сухой грунт также причисляется к одному из физических механизмов или источников высокочастотных микросейсмических возмущений. При его исследовании важно получить как общую оценку явления, так и проанализировать параметры, характеризующие его

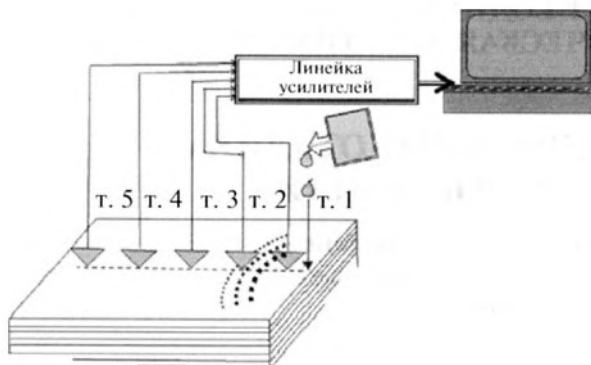


Рис. 1. Схема эксперимента.

детали. Для общей оценки представляет интерес, например, масштаб пространственной корреляции микросейсм, возникающих при выпадении осадков. При детальном его изучении важными являются такие показатели как уровень и спектр сейсмических колебаний, создаваемых одной каплей, падающей на твердый грунт.

В свете сказанного представляют интерес экспериментальные данные о сейсмическом отклике на элементарный, единичный акт падения на грунт капли воды, в частности, об уровне и спектральном составе импульса виброускорения поверхности грунта непосредственно в области падения капли. Кроме результатов лабораторного эксперимента, необходимо рассмотреть теоретическую модель сейсмического возмущения, создаваемого каплей, падающей на твердую поверхность. Для теоретической оценки уровня и спектрального состава сейсмического отклика далее используется простейшее представление с использованием идеализации абсолютно неупругого удара.

В эксперименте осуществляется лабораторное моделирование сейсмического отклика на воздействие падающей капли на мягкий грунт. Для получения первичных данных используется модель грунта в виде искусственной среды — пачки из 12–13 листов облицовочного материала толщиной 3–4 см, лежащих плотно друг на друге (см. рис. 1) и образующих куб-матрас (1 м × 1 м × 0.5 м). Таким образом, вместо сейсмического используется упруго-волновой аналог. Над плоской верхней границей мата установлен штатив с капельницей (расстояние от ее среза до границы ≈ 0.9–1 м), из которой на эту границу капает вода (период ≈ 1 с). Для регистрации импульсных упруго-волновых сигналов, возбуждаемых ударом капель, падающих на поверхность, используется пять вибродатчиков-акселерометров Type KD-45 (коэффициент эл.-мех. связи $K = 10 \text{ мВ}/(\text{м с}^{-2})$) производства RFT (Германия). Регистрация упруго-волнового отклика стандартным сейсмоприемником-вело-

симетром СВ-20 малоэффективна ввиду значительных искажений, вносимых в упруго-волновое поле самим габаритным датчиком. Влияние аналогичных искажений при использовании акселерометра KD-45 сведено к минимуму из-за малого веса и размера приемника. Упругие колебания при приеме преобразуются в электрические сигналы, которые подаются на вход многоканальных типовых низкочастотных усилителей (звуковой диапазон), с выхода которых — на вход компьютера. Для поканальной регистрации и обработки реализаций сигнала, принятых каждым из пяти вибродатчиков, используется специальная программа.

Линейно-акустические характеристики искусственной среды, используемой для моделирования, как и ее нелинейные упруго-волновые свойства, близки к аналогичным характеристикам для мягких, рыхлых грунтов в естественных условиях [8, 9]. По данным [8], эффективные значения скоростей продольной и поперечной волн в таком сэндвиче составляют $c_l \approx 65 \text{ м/с}$, $c_t \approx 9 \text{ м/с}$, а средняя плотность материала $\rho \approx 750 \text{ кг/м}^3$. Таким образом, искусственная модель среды характеризуется величиной отношения скоростей $c_l/c_t \approx 6$, при которой эффективный коэффициент Пуассона близок к 0.5, что свидетельствует о ее “водоподобности”. При моделировании сейсмических волновых импульсов путем использования упругих импульсов-аналогов в искусственной среде получается уменьшение пространственных масштабов волновых возмущений, пропорциональное снижению параметров упругости — скоростей распространения волн сжатия и сдвига, которые для большинства обычных жестких грунтов превышают эти параметры в 20–30 раз [9], что и демонстрирует степень миниатюризации. В лабораторном эксперименте с такой искусственной средой возможен более тщательный анализ особенностей структуры поля вибрации, возбуждаемой при ударе капли.

Изложим теоретические предпосылки, позволяющие получить количественный прогноз результатов лабораторного моделирования, в частности, уровня виброперемещений. Благодаря установке среза капельницы над жесткой поверхностью на высоте 0.9–1 м, падающая капля непосредственно перед соприкосновением с твердой границей набирает скорость $\approx 4\text{--}4.5 \text{ м/с}$. С учетом средних значений: пространственного масштаба капли $l = 4\text{--}5 \text{ мм}$ и ее массы $M = \pi r l^3/6 = 65.45 \text{ мг}$, запасенная энергия составляет $W \approx 33.5 \times 10^{-5} \text{ Дж}$. Подразумеваемая удар неупругим, с учетом вышеуказанного значения скорости капли в момент соприкосновения с границей, а также условий сохранения энергии-импульса, нетрудно оценить величину эффективной силы воздействия на границу и длительности взаимодействия. Указанные

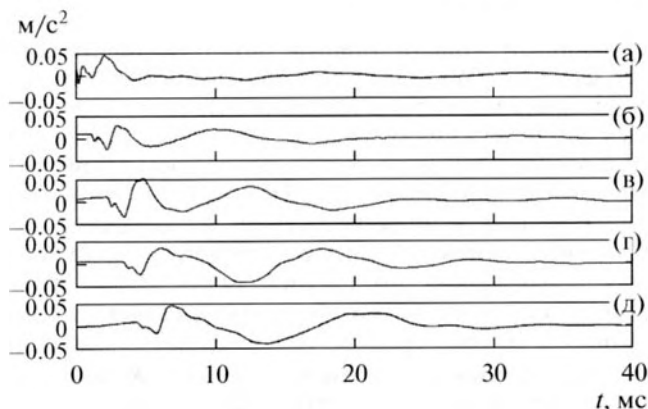


Рис. 2. Реализации вибросигнала на удалениях: (а) 1.5 см, (б) 8.5 см, (в) 15.5 см, (г) 22.5 см, (д) 29.5 см.

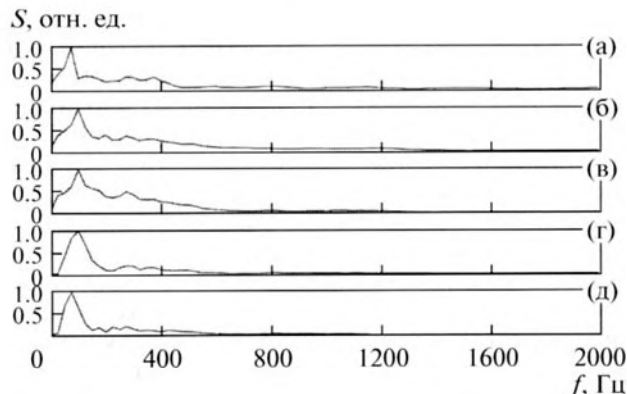


Рис. 3. Нормированные амплитудные спектры вибросигнала: (а) 1.5 см; (б) 8.5 см; (в) 15.5 см; (г) 22.5 см; (д) 29.5 см.

значения силы и эффективной длительности можно определить как $F = W/l \approx 6.7 \times 10^{-2}$ Н, $\tau = 2l/V \approx 2$ мс и рассчитать на их основе параметры импульса вибро смещений в предположении, что они представляют собой поверхностную волну Рэлея, цилиндрически расходящуюся по всем направлениям от места падения. Известно

[10, 11], что связь между пиковыми значениями сейсмического импульсного отклика u_z^{R-wave} и воздействующей силы

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ F_0 e^{-t/\tau}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

имеет вид

$$u_z^{R-wave}(z=0) = \frac{F_0 \tau e^{i\pi/4} \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_l^2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{\omega} e^{-i\omega(t-r/c_R)}}{i\omega\tau - 1} d\omega}{16\pi^2 \rho c_l^4 \sqrt{2\pi r c_R} \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_l^2}} \left\{ 4 - \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_l^2}} \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_l^2}} \left(\frac{1}{1 - c_R^2/c_l^2} + \frac{1}{1 - c_R^2/c_l^2} + 2 \right) \right\}}, \quad (2)$$

где t – время, τ – длительность воздействия, ω – частота как переменная интегрирования, c_R – скорость рэлеевской волны, r – горизонтальная дистанция.

Для расчета уровня отклика на удалениях порядка длины волны от эпицентра можно использовать упрощенное выражение с заменой F_0 на F :

$$u_z^{R-wave}(z=0) \approx \frac{F}{16\pi^2 \rho c_l^2 \sqrt{2\pi r c_R} \tau}. \quad (3)$$

Подстановка в (3) вышеупомянутых величин F , τ и параметров ρ , $c_l \approx c_R$ и $r \approx 0.1-0.3$ м позволяет количественно оценить величину отклика, которую удобнее выразить с использованием виброускорения $\ddot{u}_z^{R-wave} = (4\pi^2/\tau^2) u_z^{R-wave}$, допускающего сравнение с экспериментально регистрируемыми значениями. Расчет показывает, что пиковое значение виброускорения в импульсном отклике должно составлять ≈ 0.36 м/с², а аналогичная величина, соответствующая колебательной скорости, ≈ 0.6 мм/с.

Сигналы, принятые в ближайшей к точке воздействия т. 1 (на контрольном канале) и в более удаленных точках (т. 2, т. 3, т. 4, т. 5) перед их подачей для обработки в компьютер могут усиливаться на $\approx 40-60$ дБ.

По результатам анализа последовательности импульсов вибрации, регистрируемых в непосредственной близости от места удара (в т. 1) периодически падающими каплями, сигнал характеризуется достаточно высокой повторяемостью формы, свидетельствующей о высокой стабильности исследуемого естественного источника колебаний, что позволяет использовать процедуру накопления (вплоть до сотни импульсов).

Далее обратимся к результатам анализа единичного воздействия. На рис. 2а, б, в, г, д представлены осциллограммы сигнала, возбуждаемого одним актом падения капли, зарегистрированного в пяти точках на удалениях 1.5, 8.5, 15.5, 22.5 и 29.5 см от места падения, а на рис. 3а, б, в, г, д изображены соответствующие им амплитудные спектры, нормированные к единице. Осциллограммы сигналов, зарегистрированных датчика-

ми, установленными на поверхности мата во все более удаленных точках, воспроизводят в основных чертах сейсмические отклики на импульсное воздействие источника, традиционно наблюдаемые при сейсмопрофилировании грунта. Виброотклики качественно подобны сейсмическим откликам, возбуждаемым при работе сейсмических источников, т.е. основные эффекты, наблюдаемые при возбуждении и распространении сейсмических волн, моделируются в лабораторных условиях упругими волнами. Кроме того, при лабораторном моделировании удается получить ранее не представленные в литературе данные — амплитудные значения виброускорения упругих импульсов, порождаемых таким естественным источником микросейсм, каким является падающая капля воды, а также спектр этих импульсов. Отклик начинается вступлением слабоинтенсивной высокочастотной P -волны, сменяемой существенно более интенсивной, но низкочастотной и низкоскоростной R -волной, которая подвержена частотной дисперсии. Это нетрудно видеть по увеличению задержки момента вступления наиболее интенсивной поверхностной низкоскоростной R -волны относительно вступления P -волны. На реализациях отчетливо выражена задержка во времени прихода объемной P -волны, нарастающая примерно на 1 мс по мере пошагового удаления точек регистрации. По мере удаления точек приема от исходной точки генерации происходит увеличение длительности реализации с образованием осциллирующей и быстро затухающей хвостовой части. При длительности 5 мс в начальной точке (дистанция 1.5 см), имеет место длительность 20–25 мс в точке на удалении 30 см, что свидетельствует о дисперсионном расплывании, характерном для волны поверхностного типа. Спектр сигнала в описываемом эксперименте во всех измерительных точках достаточно широк — в точке воздействия он имеет полосу до 2 кГц, а на расстоянии порядка “длины волны” его энергонесущая полоса занимает интервал 10–600 Гц. Максимум спектральной амплитуды приходится на 100–150 Гц. Пиковое значение вибрационного импульса в непосредственной близости от места удара о поверхность мата составляет ≈ 0.05 м/с², что почти на порядок уступает теоретической оценке колебательного ускорения на границе полугораниченной среды. Значение оказывается несколько заниженным относительно расчетного, получаемого в предположении о природе отклика в виде рэлеевской волны. Это объясняется тем, что только некоторая доля энергии тратится на поддержание волнового возбуждения, кроме того, лишь некоторая доля — на генерацию собственно R -волны, наряду с которой возбуждаются и другие — объемные типы волн, а также на отток энергии, связанный с “вязкими” потерями в ближней зоне источника возбуждения.

Важно обратить внимание, что в условиях миниатюрной модели удается детально наблюдать все фазы возбуждения сейсмических импульсов. Они проявляются и в самом его начале — на первых миллисекундах распространения импульса по поверхности мата, и при последующем развитии, когда формируются объемные продольные, т.е. P -волны и поверхностные рэлеевские, т.е. R -волны в отдельности. Непосредственно на первых сантиметрах дистанции происходит “расщепление” исходного сейсмоотклика на импульс P -волны малого уровня, вступающий первым, и на последующий, соответствующий R -волне и имеющий больший размах. Такой сценарий характерен при протекании физических процессов генерации сейсмических импульсов в полномасштабных, но применительно к столь миниатюрному “капельному” механизму возбуждения он ранее не демонстрировался. В пределах дистанций между точками источник–приемник ≈ 0.1 –1 м в лабораторных условиях, которые моделируют рыхлый грунт (например, близкий по упругим или акустическим параметрам к мягкому суглинку), демонстрируются основные черты, характерные для распространения сравнительно “короткоимпульсных” для сейсмике сигналов, и применительно к такому “высокочастотному” диапазону указанные особенности наглядно и подробно рассматриваются впервые.

По результатам эксперимента можно заключить, что факторами, определяющими эволюцию формы по мере распространения импульса уже в ближней зоне, является диссипация упругих P -волн, а для поверхностных R -волн — совместное влияние и диссипативного, и дисперсионного факторов. Использование формул (2), (3), применимых для упругого полупространства и приведенных для оценки колебательного уровня на удалении сначала в ближней зоне источника, а затем переходящих в волновую зону, представляется оправданным, при этом отмеченные выше количественные расхождения могут быть обусловлены вариациями массы капли. Волна Рэлея является преобладающей по амплитуде волной, и для грубой оценки уровня неважно — подвержена она дисперсии или нет, а также вызвана ли эта дисперсия контактными условиями на границе слоев мата или самой структурой материала слоев, и т.д.

Поэтому результаты лабораторного эксперимента следует рассматривать как удовлетворительно согласующиеся с данными интерпретации сейсмических откликов на импульсное воздействие на твердую земную поверхность, известными ранее. Представленные экспериментальные и расчетные данные можно использовать для прогноза натуральных экспериментов по регистрации сейсмических откликов на воздействие редко падающих дождевых капель. Они показывают, что падение капли следует рассматривать как мало-

амплитудный источник сейсмических возмущений естественной природы, колебания которого вследствие их высокочастотности обнаруживаются только в пространственно-ограниченной малой области в непосредственной близости от точки воздействия.

Данный вывод остается в силе несмотря на то, что при выпадении осадков в естественных условиях скорость падающих капель почти на порядок выше, чем в лабораторном эксперименте (≈ 40 м/с), и, следовательно, сейсмический отклик на падающую в атмосфере каплю может намного превысить по уровню наблюдаемый в лабораторных условиях. Но и в этом случае воздействие на грунт одиночной капли является малоэффективным источником сейсмических возмущений, что следует из результатов их регистрации при слабом дожде (вплоть до умеренного) [4–6]. В пересчете к единицам колебательной скорости вышеуказанное пиковое значение уровня вибрации от воздействия капли в точке падения составляет ≈ 50 мкм/с и только в ближайшей ее окрестности превышает уровень полезных сигналов, который при проведении сейсмопрофилирования на реальной земной поверхности часто оказывается много ниже указанного, поскольку не превышает единиц или долей мкм/с. Очевидно, диссипация сейсмических волн со сравнительно высокими спектральными частотами при распространении вдоль поверхности грунта способствует резкому снижению уровня микросейсм этой природы уже на первых метрах дистанции от места падения капли [9]. Поэтому при низкой пространственной плотности и редких по времени воздействиях их вклад в общий микросейсмический фон, где доминируют низкочастотные ветровые микросейсм, незначителен. С учетом изложенного можно заключить, что в реальных условиях высокочастотные микросейсмические шумовые помехи, препятствующие регистрации полезных сигналов на сейсмостанциях при сейсмопрофилировании или других работах, могут создаваться только при массовом воздействии капель воды на поверхность грунта, т.е. при воздействии сплошного дождевого потока.

Исследуемый механизм генерации высокочастотных микросейсм дождем, как подчеркнуто выше, не является доминирующим, вследствие чего анализ явления в целом и обсуждение его характеристик к настоящему времени в литературе не получили такого же распространения, как в случае падения капель на поверхность воды. Однако многие физические особенности воздействия падающих капель на грунт и характеристики сейсмических откликов остаются изученными не полностью, и настоящая работа имеет целью пополнение первичных данных, а также дальнейшее продвижение в их анализе. Для практического применения представляет интерес рассмотреть влияние на спектральный состав сейсмических

колебаний параметров упругости или жесткости среды, структуры границы и т.д. В дальнейшем целесообразно получить экспериментальные данные о спектре и уровне сейсмоакустического отклика, вызванного дождевым потоком разной интенсивности, оценить радиус пространственной корреляции высокочастотных микросейсм на поверхности грунта, рассмотреть качественное отличие этих данных от аналогичных, зарегистрированных при падении одиночной капли. Также целесообразно подтвердить теоретические выводы, полученные ранее в классических работах для водной среды и касающиеся корреляционных характеристик шумовых источников и излучаемых ими акустических полей [12], но теперь применительно к условиям суши, в которых их волновой состав отличается некоторым своеобразием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дрягин В.В. Сейсмоакустическая эмиссия нефтепродуктивного пласта // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 6. С. 744–751.
2. Чеботарева И.Я. Методы пассивного исследования геологической среды с использованием сейсмического шума // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 844–853.
3. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Краснописцев Н.В., Куццов А.В., Ларионов И.А., Маранулец Ю.В., Рутенко А.Н., Шевцов Б.М. Аномалия высокочастотных сигналов геоакустической эмиссии как оперативный предвестник землетрясения // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 97–109.
4. Ffowcs-Williams J.E., Pumphrey H.C. Rain noise // J. Acoust. Soc. Am. 1992. V. 91. P. 2321.
5. Normark E. Wind and rain induced noise on reflection seismic data / Near Surface 2011 – the 17th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Monitoring and Characterization. 12 September, 2011. EAGE.
6. Peck L. Overview of seismic noise and its relevance to personnel detection / US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center. April, 2008. ERDC/CRRELTR-08-5.
7. Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Генерация звука при падении капли на поверхность воды // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 792–803.
8. Заславский Ю.М., Пачин Е.В. Лабораторное моделирование сейсмического приема на виртуальную антенну / Сб. трудов семинара научной школы проф. С.А. Рыбака “Акустика неоднородных сред”. Ежегодник РАО. 2007. С. 131–145.
9. Сейсморазведка. Справочник геофизика. Под ред. Гурвича И.И., Номоконова В.П. М.: Недра, 1981. 464 с.
10. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Ч. 1, 2. М.: Мир, 1983. 880 с.
11. Заславский Ю.М. Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. Н. Новгород: Изд. ИПФ РАН, 2007. 200 с.
12. Курьянов Б.Ф. Пространственная корреляция полей, излученных случайными источниками на плоскости // Акуст. журн. 1963. Т. 9. № 4. С. 441–448.